

## NEUE ENERGIEN 2020

### Publizierbarer Endbericht – INDEX

#### **Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

#### **Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und besteht aus mindestens 10 Seiten:

#### **1. Einleitung**

##### **Aufgabenstellung**

In den letzten Jahren ist der Kühlbedarf in Gebäuden stark gestiegen. Zuzufolge mehrerer nationaler und internationaler Studien wird sich dieser Trend auch in den kommenden Jahren fortsetzen. Gründe dafür sind, neben den klimatischen Veränderungen, auch die konstruktive Bauweise, steigende innere Lasten und erhöhte Behaglichkeitsansprüche sowohl in privaten Haushalten als auch in Bürogebäuden. Derzeit wird der Großteil des Kühlbedarfs durch konventionelle, elektrisch betriebene Kältemaschinen gedeckt, was zu einer verstärkten Beanspruchung und, in manchen Fällen, zu einer Überlastung bestehender Systeme zur Stromproduktion und –verteilung führt.

Eine Entlastung dieser, mit gleichzeitiger Möglichkeit der vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien, kann durch thermisch getriebene Kälteprozesse, insbesondere durch Absorptionskältemaschinen (AKM), erzielt werden. Es besteht ein reges Interesse sowohl seitens der Fern- und Nahwärmebetreiber („Fernkälte“) als auch der Solarindustrie („Solare Kühlung“) an der Einbindung von Absorptionskältemaschinen in ihre Systeme.

Bis jetzt war diese Technologie wegen hoher Anschaffungskosten und niedriger Strompreise nur vereinzelt, in großen Gebäuden zu finden. Typischerweise wurden Maschinen im Bereich von etwa 100 Kilowatt bis zu einigen Megawatt gebaut. Kleinere Maschinen (<10kW) waren bislang hauptsächlich wegen des hohen Anteils an erforderlicher manueller Arbeit im Bereich der Wärmetauscher, die die Hauptkosten einer AKM verursachen, nicht rentabel. Das Projekt Minipac zielt darauf ab, mit innovativen Ansätzen und Methoden, kleine Absorptionskältemaschinen im Vergleich zu Kompressionssplitgeräten marktfähig zu machen.

##### **Schwerpunkte des Projektes**

Zielsetzung in diesem Projekt war eine erfolgreiche Entwicklung eines Funktionsmuster einer Absorptionskältemaschine im gewünschten Leistungsbereich (<10kW) unter Durchführung folgender Forschungsarbeiten:

- Gase, die durch Korrosion im System entstehen, wirken sich sehr negativ auf die Effizienz der Kältemaschine, sowie auf ihre Lebensdauer aus. In diesem Projekt werden Lösungen für die Verhinderung der Entstehung bzw. Beseitigung dieser Gase aus dem System untersucht.
- Die Wärmetauscher bilden das Kernstück jeder AKM und sind gleichzeitig ihr teuerster Teil. Hier soll ein völlig neues Konzept hinsichtlich ihrer Effizienz und Eignung untersucht werden.
- Für den Betrieb einer AKM ist eine Rückkühlung notwendig. Am Markt befindliche Kühltürme sind für die beabsichtigte Anwendung aus mehreren Gründen nicht geeignet. Im Rahmen des Projektes werden neue Konzepte untersucht und entwickelt.
- Abschließend erfolgt der Zusammenbau und Test einer kompletten AKM. Die Untersuchung der Interaktion aller Komponenten untereinander wird in einer Reihe von Experimenten untersucht.

## Einordnung in das Programm

Das Projekt hat folgende Themenpunkte der 1. Ausschreibung des Programmes Neue Energien 2020 adressiert:

1. Themenpunkt 3.6.6: Wärmepumpen/Kälteanlagen
2. Themenpunkt 3.1.2: Smart Systems und verteilte Energiesysteme

Dabei wurden folgende Programmziele verfolgt:

- *Sicherstellung der Kriterien der Nachhaltigkeit: ökonomisch, ökologisch und sozial dauerhaft.* Thermisch getriebene Kältemaschinen sind durch den Einsatz kostengünstiger und emissionsarmer (Nah- oder Fernwärme) bzw. emissionsneutraler (Solar, Nahwärme mit Biomasse) Antriebsenergie ökologisch und ökonomisch im Betrieb und stellen damit die Kriterien der Nachhaltigkeit sicher. Bei der Einbindung von AKM in solare Systeme wird fast ausschließlich (mit Ausnahme von Strom für die Regelung und die Pumpen) erneuerbare Energie zum Antrieb der Anlage benötigt und damit eine Erschließung von Ressourcen erneuerbarer Energieträger ermöglicht.
- *Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz des Wirtschaftssystems.* Die Einbindung von thermisch getriebenen Kältemaschinen in Nah- oder Fernwärmenetze kann durch Senkung der Rücklauftemperaturen zu einer Erhöhung der Primärenergienutzung beitragen. Niedrigere Rücklauftemperaturen haben einen direkten Einfluss auf die Effizienz des Gesamtsystems und damit auch auf die höhere Nutzung des Primärenergieträgers.
- *Reduktion der Importabhängigkeit bei Energieträgern durch die Senkung von Spitzenlasten im Sommer.* Dadurch wird der Bedarf an kalorischen Kraftwerken, die Erdgas oder Erdöl bzw. Kohle verstromen, sinken und die Nutzung von Biomasse oder Solarenergie erhöht.
- *Aufbau und Sicherung langfristig klimaschützender Raum- und Wirtschaftsstrukturen.* Sowohl die Solarindustrie, als auch die Nah- und Fernwärmebranche sind am Einsatz von geplanten AKM kleiner Leistung sehr interessiert. Beide Branchen tragen zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses durch Bereitstellung von Energie für die Klimatisierung von Büro- und Wohnräumen und für die Bereitstellung von Warmwasser beträchtlich bei.

- *Multiplizierbarkeit, Hebelwirkung und Signalwirkung.* Die Ergebnisse aus diesem Projekt können auch für das Design von Komponenten im größeren Leistungsbereich relevant sein. Weiters kann sich die Möglichkeit der solaren Kühlung, auch im Leistungsbereich unter 10kW, auf den Solarmarkt durch erweiterte Leistungsangebote positiv auswirken.
- *Erhöhung des inländischen Wertschöpfungsanteils im Energiesystem.* Kleine Klimasplitgeräte, welche unmittelbar mit dem geplanten Produkt konkurrieren, sind fast zu 100% ein Importprodukt. Die Entstehung eines heimischen Kompetenzclusters für thermische Kühlung mit gleichzeitiger örtlichen Weiterentwicklung und Produktion von Geräten und Komponenten würde den inländischen Wertschöpfungsanteil auf dem Gebiet der Klimatisierung deutlich erhöhen.

## Verwendete Methoden

Um die ambitionierten Ziele im Projekt zu erreichen, werden verschiedene Methoden herangezogen. Ein wesentlicher Schwerpunkt lag dabei auf experimentellen Arbeiten, die an mehreren Versuchsanlagen durchgeführt werden. Die Anlagen werden vom AIT mit Unterstützung der Projektpartner geplant und in den hauseigenen Labors aufgebaut, wo die Durchführung der Experimente und deren Auswertung erfolgen. Unterstützend dazu werden gängige Simulations- (CFD) und Ingenieurtools (CAE) verwendet.

## Aufbau der Arbeit

Im Projekt waren folgende Arbeitspakete vorgesehen:

### AP10 Entwicklung von Antikorrosionsmaßnahmen

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Durchführung von Korrosionsversuchen unterschiedlicher Materialien in LiBr/H<sub>2</sub>O-Lösungen und das Design eines Intertgasentfernungssystems.

### AP20 Entwicklung des Wärmetauschermoduls

Als Basis für die in AP 40 durchgeführten Untersuchungen am Gesamtsystem wurde in diesem Arbeitspaket die Entwicklung der einzelnen Wärmetauschermodule durchgeführt. Dabei wurden die für die Fallfilmapparate notwendigen Flüssigkeitsverteiler, die Geometrien der Kühlseite und die Rahmenkonstruktion entwickelt und konstruiert.

### AP30 Entwicklung des Rückkühlmoduls

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte die experimentelle Untersuchung eines neuartigen Rückkühlkonzeptes an Hybridkühlern.

### AP40 Versuchsaufbau – Gesamtsystem

Basierend auf den in AP 20 gefertigten Wärmetauschermodulen wurde eine einstufige Absorptionskältemaschine aufgebaut und deren Wirkungsweise bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen experimentell untersucht.

## 2. Inhaltliche Darstellung

### AP10 Entwicklung von Antikorrosionsmaßnahmen

In Rahmen der Korrosionsversuche wurden Probenstücke in einer LiBr-Lösung unter Vakuum einige Wochen auf konstanter Temperatur gehalten (siehe Abbildung 1). Der dazu notwendige Versuchsaufbau wurde im Rahmen des Projektes entwickelt und aufgebaut. Als Proben wurden die in Absorptionskältemaschinen üblicherweise verwendeten Metalle C-Stahl, Kupfer und Edelstahl (1.4404) im Vergleich zu einem Beschichtungsmaterial auf Basis von SiC untersucht. Damit konnte ein mögliches Verbesserungspotential durch Beschichtungen dargestellt werden. Durch die Korrosion bilden sich Inertgase, die durch den Druckanstieg im System messbar sind. Um die Korrosionserscheinungen qualitativ und quantitativ ausreichend beschreiben zu können, wurde der Gewichtsverlust der Proben bestimmt, die LiBr-Lösung auf gelöste Bestandteile der Proben analysiert und die Oberflächen unter einem optischen Mikroskop und einem Elektronenmikroskop betrachtet.



**Abbildung 1: Versuchsaufbau für Korrosionsversuche**

Für die Auswahl eines Ejektorsystems wurden zuerst die Rahmenbedingungen (Drücke, Temperaturen, Massenströme, Inertgasanteil) für den Gesamtprozess definiert [1]. Auf Basis dieser Daten wurde danach eine Anfrage zur Fertigung eines Prototyps für die spezielle Anwendung zu entsprechenden Herstellern gestellt. Die verfahrenstechnische Auslegung des Ejektors oblag dabei den Herstellern.

### AP20 Entwicklung des Wärmetauschermoduls

Die eingesetzten Wärmetauschermodule bestehen im wesentlichen aus den Komponenten des Flüssigkeitsverteilers, der Wärmeübertragerplatte an der der Fallfilm senkrecht abfließt, der Sekundärseite (an der je nach Bereich entweder Wärme in oder aus dem Apparat mittels eines Fluides (Wasser) gebracht wird) und dem Rahmen, in dem die Platten inklusive Verteiler und Sekundärseite montiert werden. Die Konstruktionsarbeiten zur Darstellung der Flüssigkeitsverteiler, des Plattendesigns und der Gesamtkonstruktion wurden mit SolidWorks durchgeführt. Bei den Flüssigkeitsverteilern wurden zwei Systeme entwickelt, wobei in der Gesamtanlage das offene

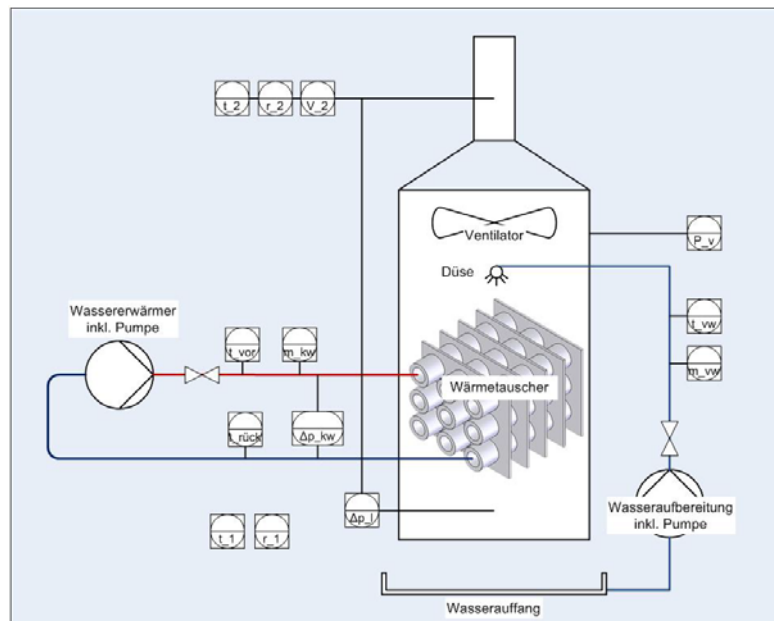
System eingebaut wurde (siehe AP40). Das Design der wasserseitigen Kanäle für den Wärmetauscher (Sekundärseite) wurde mit Hilfe von CFD-Simulationen (Fluent) durchgeführt. Mit Hilfe numerischer Strömungssimulation (numerische Lösung der Navier Stokes Gleichungen) wurden verschiedene Designs für den Wärmetauscher untersucht. Durch Veränderung der Geometrie und Lage diverser Strömungsbarrieren wurde ein Design erarbeitet, welches eine optimale Verteilung der Kühlflüssigkeitsmenge bei unterschiedlichen Durchflüssen über die Wärmetauscherrückseite ermöglichte. Die Oberflächen, an denen die Fallfilme abrinnen, sind zur Verbesserung der Benetzungseigenschaften und zur Erhöhung der Stoff-Wärmeübergänge mit einer speziellen Oberflächenstruktur ausgestattet. Die Platte inklusive Verteiler ist in Abbildung 2 dargestellt. Dabei wurde der Flüssigkeitsverteiler durchsichtig ausgeführt, um den Flüssigkeitsstand während den Experimenten überprüfen zu können. Ein wesentliches Merkmal der Konstruktion ist, dass die Wärmeübertragerplatten in den Modulen aufgehängt sind, um so Wärmeverluste durch Wärmeleitung zu minimieren.



**Abbildung 2: Wärmeübertragerplatte und Flüssigkeitsverteiler (links) und Seitenansicht mit angeschraubter Sekundärseite (rechts)**

## AP30 Entwicklung des Rückkühlmoduls

Prozessbedingt wird die Abwärme einer Absorptionskältemaschine bei einem Temperaturniveau von ca. 30°C abgeführt. Das bedingt bei Außentemperaturen größer 25°C den Einsatz von feucht betriebenen Rückkühlern. Das im Projekt untersuchte Rückkühlkonzept basiert auf einen kompakten Lamellenkühler, der als Hybridkühler sowohl trocken als auch feucht betrieben werden kann. Der Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten lag dabei in der Einbindung der Wasserverdüsung und -verteilung in das Rückkühlsystem. Das Verfahrensschema (R&I Schema) des Rückkühlversuchsaufbau und die Gesamtkonstruktion des Rückkühlers sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt [2]. Zur Einstellung definierter Umgebungsbedingungen (Temperaturen und Luftfeuchte) wurden die Experimente in einer Klimakammer durchgeführt. Die Versuche wurden für Klimadaten für Wien und für eine Rückkühleraustrittstemperatur von 28°C durchgeführt. Dieser Wert wurde auch in der Auslegung des Gesamtsystems in AP 40 herangezogen.



**Abbildung 3: Verfahrensschema des Versuchsaufbaus Rückkühler**



**Abbildung 4: Versuchsaufbau Rückkühler (Vorder- und Rückseite) in einer Klimakammer am AIT**

## AP40 Versuchsaufbau – Gesamtsystem

Basierend auf den Arbeiten in AP20 wurde das Gesamtsystem ausgelegt und geplant. Dabei wurde die Sekundärseite der Stoff- und Wärmeübertrager in der nach CFD-Simulationen optimalen Variante ausgewählt. Von den beiden im AP20 dargestellten Flüssigkeitsverteilssystemen wurde die drucklose Variante gewählt, da dadurch im Gesamtsystem eine Umwälzpumpe eingespart werden kann. Als Auslegungsparameter wurden folgende Werte gewählt:

- Absorberleistung ca. 300 W
- Kälteleistung ca. 200 W
- Absorbereintrittstemperatur Sekundärseite 28°C (Absorber und Kondensator in Serie geschaltet)
- Generatoreintrittstemperatur Sekundärseite 90°C
- Verdampfereintrittstemperatur zwischen 5 und 10°C

Diese Parameter entsprechen einem Anforderungsprofil, das an der Antriebsseite der Maschine den Einsatz von Fernwärme und Niedertemperatursolarthermie bzw. auf Nutzseite den Einsatz von Fancoils ermöglichen würde. Das Anlagenschema entspricht einer einstufigen Absorptionskältemaschine (Abbildung 5). Die Versuchsanlage wurde in einer Klimakammer aufgebaut, um konstante und definierte Umgebungsbedingungen bei der Durchführung der Experimente zu garantieren (Abbildung 6).

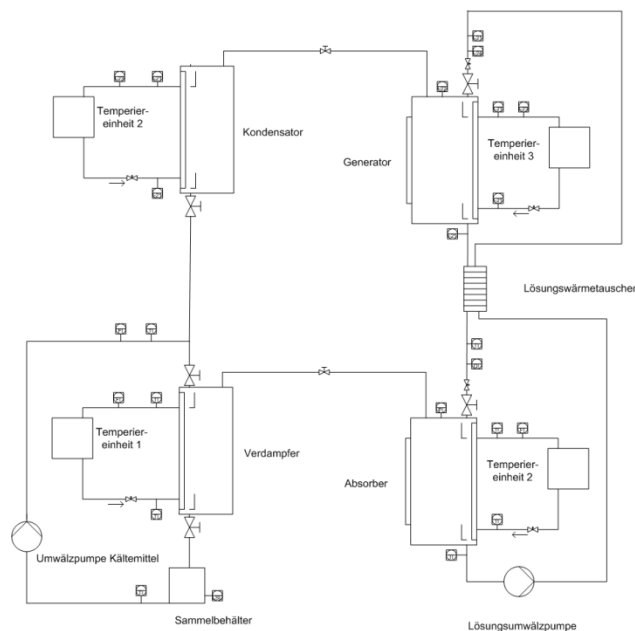


Abbildung 5: Anlagenschema des Gesamtsystems



**Abbildung 6: Versuchsaufbau des Gesamtsystems in einer Klimakammer am AIT**

### **3. Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

#### AP10 Entwicklung von Antikorrosionsmaßnahmen

In den Korrosionsversuchen wurden folgende Resultate erzielt:

- Die Ergebnisse sind in sich konsistent.
- Unter dichten Versuchsbedingungen (d.h. kein Sauerstoffeintrag) weisen Kupfer und Edelstahl keine Korrosionserscheinungen auf.
- Die Stahlproben zeigen eine Veränderung der Oberfläche, wobei es sich um einen flächigen Angriff handelt.
- Die eingesetzte Beschichtung ist unter den Bedingungen robust und lässt keine korrosionsbedingten Veränderungen erkennen. Die Beschichtung könnte daher als Schutzfunktion bei starken Undichtheiten eingesetzt werden.
- Der Einsatz von Molybdän als Korrosionsinhibitor zeigt keinen wesentlichen Unterschied auf die Korrosionseigenschaften.
- Alle Proben weisen Ablagerungen von Silizium und Sauerstoff auf, die die Erkennbarkeit von Korrosionserscheinungen an der Werkstoffoberfläche einschränken. D.h. diese Produkte könnten von den Probengefäßen (Glas) stammen.

Das untersuchte Inertgasentfernungssystem auf Basis einer Ejektorpumpe wurde für die Einbindung an einer einstufigen Absorptionskältemaschine ausgelegt und in das Anlagenkonzept integriert. Dabei wurde festgestellt, dass auf Grund der machbaren Fertigungsgrößen ein sinnvoller Einsatz eines Ejektorsystems erst in Maschinen mit Kälteleistungen größer 50 kW möglich ist. Im Bezug auf Korrosionsschutzmaßnahmen stellt die Anlagendichtheit ein wesentliches Kriterium dar. Dabei ist ein wesentlicher Unterschied zwischen Versuchsanlagen und Anlagen im Prototypenstadium gegeben. D.h. ein möglicher Prototyp muss dicht verschweisst sein und es sollten keine Flanschverbindungen (z.B. Schaugläser) verwendet werden. Die Verwendung der untersuchten Beschichtung kann dabei als Schutzfunktion bei auftretenden Undichtheiten wirken.



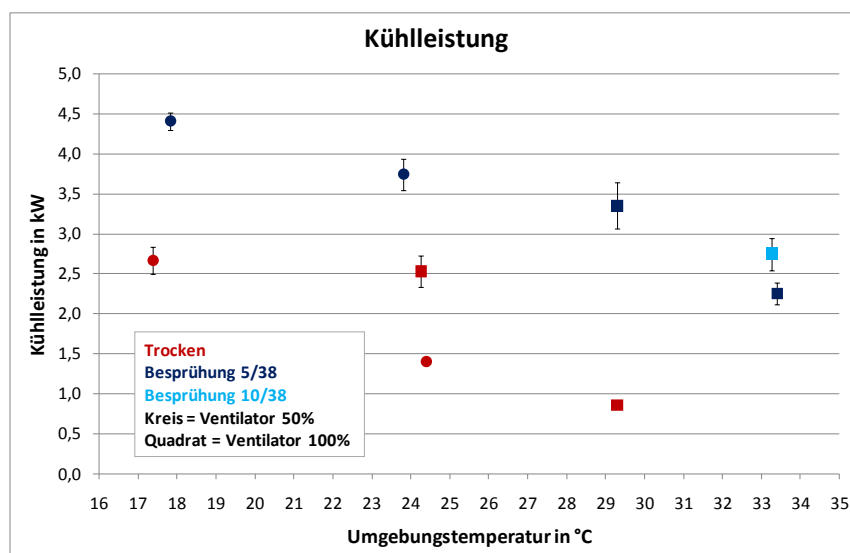
## AP30 Entwicklung des Rückkühlmoduls

Abbildung 7 und Tabelle 1 zeigen die über einen konstanten Zeitraum gemittelten Messwerte für die gemessene Kühlleistung bei unterschiedlichen Betriebsmodi und Betriebstemperaturen [3]. Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Ergebnissen ablesen:

- Durch die Benetzung wird ein starker Anstieg der Kühlleistung erreicht.
- Die Kühlleistung nimmt erwartungsgemäß bei gleichem Betriebsmodus mit zunehmender Luft Eintrittstemperatur ab.
- Die Auslegungsleistung von 2,5 kW kann bis ca. 25 °C noch trocken erreicht werden.
- Die Umwälzmenge des Kühlwassers reicht unter extremen Bedingungen nicht mehr aus um die Nennleistung zu erreichen, weshalb der Sprühpuls verlängert wurde.

Eine energetische Bewertung des Rückkühlers ist unter Bildung des Verhältnisses aus Kühlleistung zu Stromverbrauch (coefficient of performance - COP) möglich. Ein deutlicher Unterschied im COP ist in der Betriebsweise des Wärmetauschers gegeben (siehe Abbildung 9). Es ist deutlich zu sehen, dass der nasse Betrieb eine effiziente Erhöhung der Kühlleistung ermöglicht, während die Erhöhung der Ventilatordrehzahl energetisch ungünstiger ist.

Die Methode einen Lamellenwärmetauscher von oben mit Wasser zu benetzen ist gut geeignet um dessen Kühlleistung zu erhöhen. Der pulsierende Betrieb der Sprühwasserpumpe in Kombination mit der Drehzahlregelung des Ventilators kann dabei den Energiebedarf des Systems deutlich verringern. Der luftseitige Druckverlust steigt bei der Benetzung an, da sich an der Unterseite des Wärmetauschers Wasserfilme zwischen den Lamellen bilden, die den freien Querschnitt verringern (siehe Abbildung 8). Auf Basis dieser Erkenntnisse könnten Regelungstrategien entwickelt werden, die eine energieeffizientere Betriebsweise von Rückkühlern ermöglichen würden.



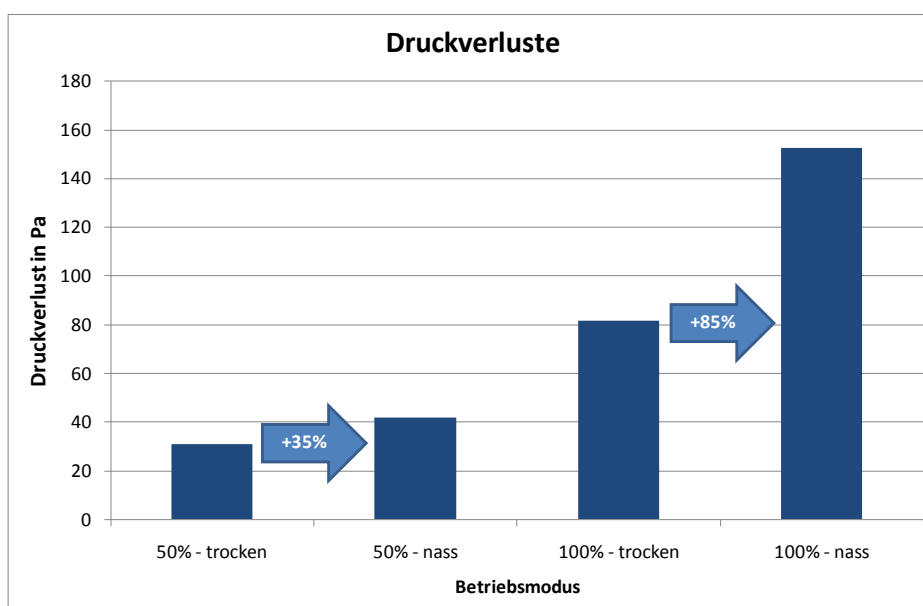
**Abbildung 7: Kühlleistung als Funktion der Umgebungstemperatur bei unterschiedlichen Betriebsmodi des Rückkühlers**

Erklärungen: Besprühpuls 5/38 bzw. 10/38 bedeutet eine Einschaltzeit der Pumpe von 5 bzw. 10 Sekunden und eine Ausschaltdauer von 38 Sekunden. Die Prozentangabe beim Ventilator bezieht sich auch die Drehzahl.

**Tabelle 1: Messergebnisse des Rückkühlers bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen**

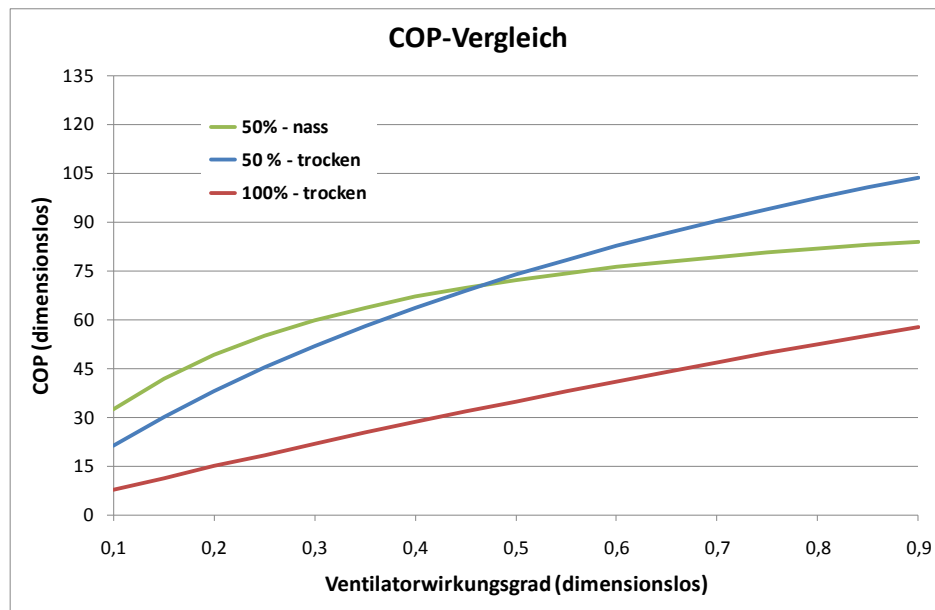
Erklärungen: Besprühpuls 5/38 bzw. 10/38 bedeutet eine Einschaltzeit der Pumpe von 5 bzw. 10 Sekunden

Sprühpuls	Ventilator-drehzahl	Lufttemperatur Eintritt	Luftfeuchtigkeit Eintritt	Feuchtkugeltemp. Eintritt	Kühlwasser-massenstrom	Kühlwassertemp. Eintritt	Kühlwassertemp. Austritt	Druckverlust luftseitig	Kühlleistung
s / s	%	°C	%rF	°C	kg/s	°C	°C	Pa	kW
aus	50	17,4			0,150	31,8	27,5	37,4	2,67
5 / 38	50	17,8	67,6	14,2	0,147	32,0	24,8	47,7	4,41
aus	50	24,4			0,150	31,9	29,7	38,5	1,40
aus	100	24,3			0,150	32,0	28,0	101,3	2,53
5 / 38	50	23,8	36,1	14,6	0,150	31,9	25,9	52,6	3,75
aus	100	29,3			0,150	32,0	30,6	93,8	0,86
5 / 38	100	29,3	35,7	18,6	0,148	31,9	26,4	179,8	3,35
5 / 38	100	33,4	33,2	21,1	0,146	32,2	28,5	163,2	2,26
10 / 38	100	33,3	33,8	21,2	0,149	32,1	27,7	186	2,75



**Abbildung 8: Druckverlust des Rückkühlers bei unterschiedlichen Betriebsmodi**

Erklärungen: Die Prozentangabe beim Betriebsmodus bezieht sich auch die Ventilator-drehzahl. Beim trockenen bzw. nassen Betrieb ist die Besprühung aus- bzw. eingeschaltet.



**Abbildung 9: Coefficient of Performance (COP) als Funktion des Ventilatorwirkungsgrades**

Erklärungen: Die Prozentangabe beim Betriebsmodus bezieht sich auch die Ventilatorzahl. Beim trockenen bzw. nassen Betrieb ist die Besprühung aus- bzw. eingeschaltet.

## AP40 Versuchsaufbau – Gesamtsystem

Ziel der Experimente war die Bestimmung der Leistungszahl (COP) bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und eine Festlegung optimaler Betriebsbedingungen für die Maschine zu untersuchen. Dabei wurden die Generator- und die Absorbereintrittstemperaturen konstant gelassen und der Lösungsmassenstrom und die Verdampfungstemperatur variiert. Die Leistungsregelung der Maschine erfolgte durch eine Variation des Massenstromes des Heizwassers am Generator. Die Verdampfungstemperatur wird durch die Art der Anwendung (Fancoils oder Kühldecken) der Kältemaschine bestimmt und sollte, um hohe COPs zu erreichen, möglichst hoch sein. Der aus der Literatur bekannte Zusammenhang, dass bei sinkender Verdampfungstemperatur sowohl die Leistung als auch der COP sinkt, konnte in den Experimenten nachgewiesen werden (siehe Abbildung 13) [4]. Die erzielten Kälteleistungen (zwischen 80 und 180 W) lagen im erwarteten Auslegungsbereich. Dabei konnte auch nachgewiesen werden, dass der Prozess auch noch mit sehr geringen Verdampfungstemperaturen von ca. 4 °C betrieben werden kann. Die Messergebnisse wurden auf den Erhalt der LiBr Massenbilanz über den Absorber überprüft (Tabelle 2). Diese zeigten sehr gute Übereinstimmungen (Abweichungen kleiner 3%) mit Ausnahme eines Wertes (Abweichung kleiner 20%). Eine direkte Bestimmung der Kälteleistung ist auf Grund einer nicht vollständigen Isolierung des Verdampfers im Bereich der Schaugläser und des Eintrages von Wärme durch die Kältemittelumwälzpumpe nur sehr ungenau möglich. Es wurde daher über die Energiebilanz des Absorbers auf die Kälteleistung rückgerechnet.

Der Einfluss unterschiedlicher Lösungsmassenströme ist als zeitlicher Verlauf in Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 bei konstanten Betriebsbedingungen dargestellt. Die dazu gehörigen zeitlich gemittelten Werte entsprechen den Versuchsläufen 1-3 in Tabelle 2. Daraus ist ersichtlich, dass eine Erhöhung des Lösungsmassenstromes um den Faktor 5, eine Erhöhung der Absorberleistung, aber nur eine geringe Erhöhung der Kälteleistung bewirkt. Bei niederen

Verdampfungstemperaturen liegt die Lösungsumwälzmenge für eine maximal erzielbare Kälteleistung höher.

Der Lösungsmassenstrom stellt einen wichtigen Parameter für eine optimale Betriebsweise der Maschine an einem bestimmten Betriebspunkt dar. Aus diesem Wert kann mit Hilfe des berechneten Kältemittelmassenstromes die spezifische Lösungsumwälzmenge berechnet werden (siehe Tabelle 2). Der Wert sollte möglichst nieder sein, um einerseits die elektrische Leistung der Umwälzpumpe zu minimieren und um andererseits den Anteil der sensiblen Wärme im Generator und Absorber zu reduzieren, um damit den COP der Gesamtanlage zu erhöhen. Vergleichswerte aus der Literatur liegen bei ca. 11, d.h. die in den Experimenten erzielten Werte liegen in derselben Größenordnung.

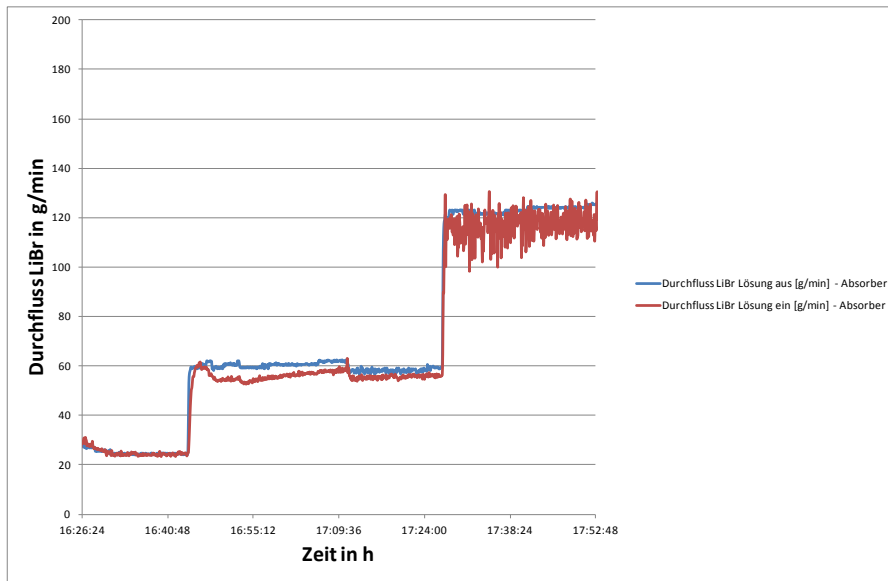


Abbildung 10: Massenstrom der LiBr-Lösung als Funktion der Zeit

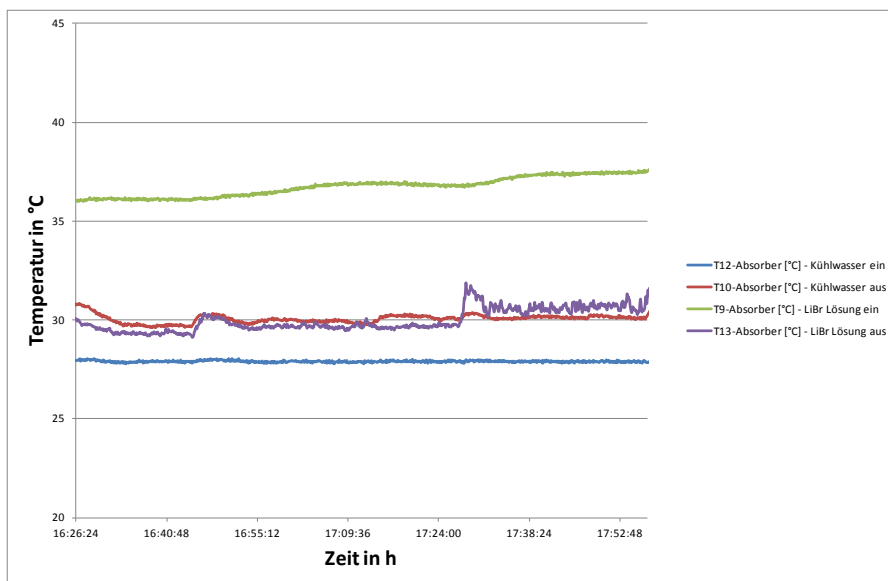


Abbildung 11: Absorberrtemperaturen als Funktion der Zeit

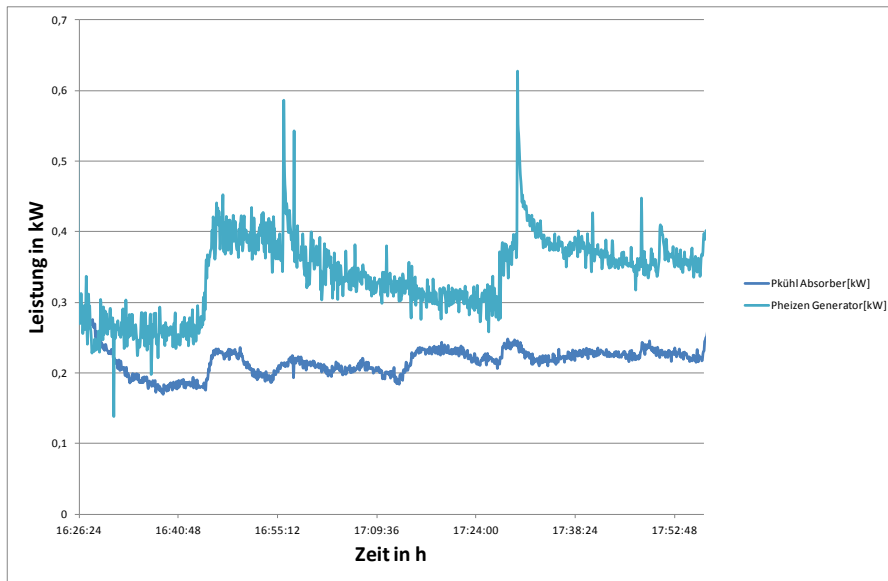


Abbildung 12: Leistung des Generators und des Absorbers als Funktion der Zeit

Tabelle 2: Zeitlich gemittelte Messwerte bzw. berechnete Größen einzelner Versuchsläufe des Gesamtsystems

Versuchs- lauf	Lösungsein- tritts- temperatur Absorber [°C]	Lösungsaus- tritts- temperatur Absorber [°C]	Kühlwasser- eintritts- temperatur Absorber [°C]	Kühlwasser- austritts- temperatur Absorber [°C]	Kaltwasser- austritts- temperatur [°C]	Absorber- druck [mbar]	Lösungs- massen- strom Absorber [g/min]	Ver- dampfung- temperatur [°C]	Entgasungs- breite [-]	spezifische Lösungsum- wälzmenge [-]	Ab- weichung der LiBr Massen- bilanz [%]	Absorber- eingangs- enthalpie [kJ/kg]	Absorber- ausgangs- enthalpie [kJ/kg]	Kühl- leistung Absorber [kW]	Sensible Wärme [kW]	Berechnete Kälte- leistung [kW]	COP [-]	Effektivität Lösungs- wärme- tauscher [-]
1	36,1	29,3	29,7	27,9	10,0	11,5	24,3	8,9	0,107	4,4	-19,8	130,0	66,1	0,186	0,026	0,160	0,61	0,99
2	36,8	29,7	29,9	27,9	8,4	9,9	60,5	6,8	0,053	8,4	-3,1	114,9	75,8	0,203	0,033	0,171	0,50	0,97
3	37,3	30,6	30,1	27,9	8,3	9,8	124,8	6,7	0,027	15,8	0,3	112,3	85,6	0,226	0,044	0,181	0,48	0,94
4	36,2	29,0	29,0	27,9	5,9	9,0	61,5	5,4	0,040	11,1	-0,9	109,7	76,9	0,106	0,027	0,078	0,21	0,95
5	37,3	29,5	29,5	27,9	5,2	8,4	119,0	4,4	0,020	20,1	1,0	118,0	91,6	0,157	0,042	0,114	0,35	0,93
6	38,4	29,8	29,7	27,9	4,9	8,2	171,8	4,1	0,018	22,8	0,9	120,3	93,7	0,179	0,063	0,117	0,34	0,90

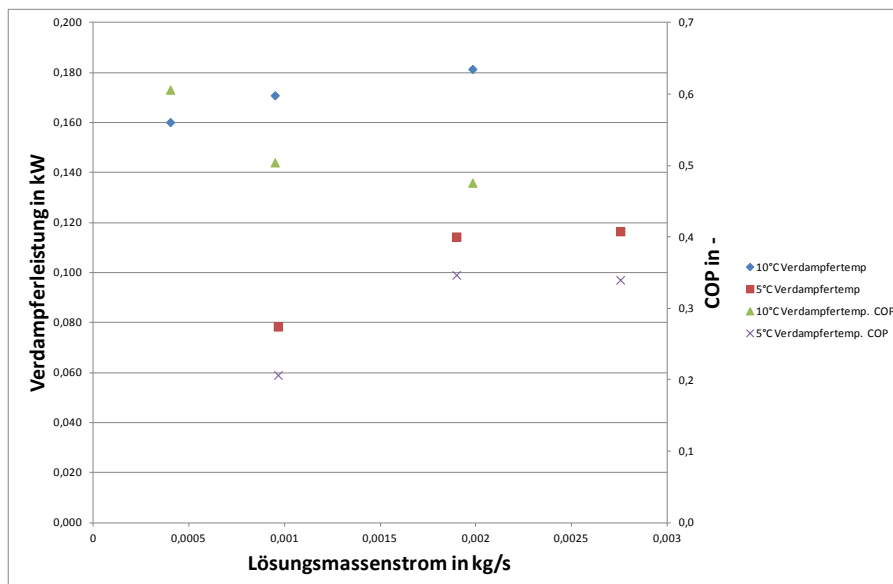


Abbildung 13: Verdampferleistung und Gesamt COP der Absorptionskältemaschine als Funktion des Lösungsmassenstrom bei unterschiedlichen Verdampfertemperaturen

## 4. Ausblick und Empfehlungen

Auf Basis der im Projekt Minipac erzielten Ergebnisse kann eine Prototypenfertigung sowohl von Wärmeübertragermodulen als auch eines kompakten Hybridkühlers und damit eines kompakten Gesamtsystems einer Absorptionskältemaschine kleiner Kälteleistung erfolgen. Für das Upscaling auf eine Kälteleistung von bis zu 10 kW sind noch in beiden Fällen folgende Planungs- und Konstruktionsarbeiten auf Komponenten bzw. Systemebene notwendig.

Im Falle der Wärmeübertragermodule muss vor allem aus Kostengründen eine Änderung der Fertigungsweise erfolgen und es müssen daher auch entsprechende Adaptionen der untersuchten Flüssigkeitsverteiler, Sekundärseite der Wärmeübertrager und des Moduldesigns durchgeführt werden. Wichtig ist eine dicht verschweisste oder verlötete Bauweise sowohl der Module als auch des Gesamtsystems, um damit den Falschlufteintrag zu minimieren. Zur Untersuchung der Dichtheit des Systems sollen Langzeitversuche durchgeführt werden, um den Einfluss geringer Leckraten auf die Performance der Kältemaschine zu evaluieren. Als Korrosionssicherheitsschutz kann die im Projekt untersuchte Beschichtung auf die Platten aufgebracht werden. Hier müssten die Machbarkeit in Bezug auf das gewählte Fertigungsverfahren (z.B. Temperaturbeständigkeit im Lötoven) und die zu erwartenden Kosten der Beschichtungen untersucht werden. Zur Verringerung der Korrosionsgefahr sollen auf jeden Fall Versuche mit neuen Arbeitsstoffpaaren durchgeführt werden, da dadurch wahrscheinlich das Problem substantiell verringert bzw. sogar vollständig gelöst werden könnte.

Im Bereich des Rückkühlers müssen vor allem Untersuchungen zur Hygiene jeweils in Langzeitversuchen durchgeführt werden. Mögliche Korrosionsprobleme der Aluminiumlamellen können durch die Verwendung von Edelstahllamellen oder epoxidharzbeschichteten Lamellen umgangen werden. Die pulsierende Betriebsweise kann sich auf Grund der stark verringerten eingesetzten Wassermengen und des langen Trockenbetriebes als ausreichende Maßnahme dafür erweisen. Die Versuche im Rahmen des Projektes Minipac konnten weder Korrosionseffekte noch Hygieneprobleme erkennen lassen. Allerdings wurden diese Versuche in einer Klimakammer über einen relativ kurzen Zeitraum durchgeführt. Hier werden noch weitere Versuche unter realen Betriebsbedingungen an unterschiedlichen Außenaufstellungsorten notwendig, um z.B. Einflüsse von Feinstäuben auf das System untersuchen zu können.

Weitere Forschungs- und Entwicklungsfragestellungen vor allem in Bereich der Regelungsoptimierung werden sich durch den Testbetrieb eines Prototyps der Gesamtanlage ergeben.

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] Implementierung eines Ejektor-Inertgasentfernungssystems in einer Absorptionskältemaschine mit 1kW Kälteleistung, S. Ahmad, Betreuer: T. Fleckl, 2011 Bachelorarbeit am FH Technikum Wien
- [2] Design and operating performance analysis of an innovative hybrid cooling unit for absorption refrigeration"; D. Rohde, Betreuer: H. Kuhlmann; Technische Universität Wien, 2011
- [3] Experimentelle Untersuchung eines innovativen Rückkühlkonzepts für solargetriebene Absorptionskältemaschinen im Leistungsbereich bis 10 kW; T. Fleckl, D. Rohde, M. Monsberger, 21. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein; 11.05.2011 - 13.05.2011; in: "Thermische Solarenergie", (2011), ISBN: 978-3-941785-57-1; S. 92 - 96.
- [4] Herold K. E., Radermacher R., Klein S. A., 1996: Absorption Chillers and Heat Pump; ISBN-10: 0-8493-9427-9